

**APROXIMACIÓN A LA ESTIMACIÓN DE LA HUELLA HÍDRICA MINERA EN EL
MUNICIPIO DE SUAREZ (CAUCA)**

Christian Eduardo Alvarez Pugliese

Código: 0740803-3340

**Trabajo de Grado Presentado como
Requisito Parcial para Optar al Título de
Economista**

Tutor:

Fiderman Machuca Martínez M.Sc. Ph.D.

**Universidad Del Valle
Facultad De Ciencias Sociales y Económicas
Departamento de Economía
Santiago De Cali
2018**

RESUMEN:

Esta investigación tiene como propósito realizar una aproximación al cálculo de los indicadores de la huella hídrica en la minería aurífera del municipio de Suarez (Cauca), con el fin de cuantificar los impactos generados por el agua no retornada en el proceso productivo y los niveles de contaminantes en los vertimientos. Encontrado que la huella hídrica azul es de 79.91 m³/kg de oro extraído y la huella hídrica gris esta el rango de 272,125.39 a 404,825.11 m³/kg de oro extraído. Los valores obtenidos fueron comparados con minas con operaciones similares en Colombia y el Sudáfrica. Estos resultados permiten tener una línea base para la toma de decisiones, la formulación de estrategias y propuestas para el sector.

PALABRAS CLAVES:

Huella Hídrica, Minería, Oro, Mercurio, Cianuro

ABSTRACT:

The purpose of this research was to estimate the water footprint indicators in gold mining in the municipality of Suarez (Cauca), in order to quantify the impacts generated by the non-returned water in the production process and the levels of pollutants in the wastewater. The blue water footprint was calculated in 79.91 m³ per kg of gold extracted and the gray water footprint was found to be in the range of 272,125.39 to 404,825.11 m³ per kg of gold extracted. The values obtained were compared with mines with similar operations in Colombia and South Africa. These results generates a baseline for decision making, formulate strategies and proposals for this sector.

KEYWORDS:

Water Foot Print, Mining, Gold, Mercury, Cyanide

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN:	2
ABSTRACT:.....	2
TABLA DE CONTENIDO	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	6
3. MARCO CONCEPTUAL	8
3.1 Panorama de la producción aurífera en Colombia	8
3.2 Panorama de la producción aurífera en el Municipio de Suarez (Cauca)	10
3.3 Huella hídrica	13
3.4 Proceso de extracción de oro	15
4. ANTECEDENTES	18
5. METODOLOGÍA	21
5.1 Alcance Geográfico.....	21
5.2 Alcance Temporal	22
5.3 Estimación de los Indicadores de Huella Hídrica	22
5.3.1 Huella hídrica azul (HHA)	23
5.3.2 Huella hídrica gris (HHG)	23
5.4 Tipo de Información.....	24
5.5 Análisis de Datos y Propuestas	30
6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	31
7 CONCLUSIONES.....	41
AGRADECIMIENTOS	42
REFERENCIAS	43

1. INTRODUCCIÓN

El 71% de la superficie terrestre están cubiertas por agua, sin embargo, menos del 1% del agua del planeta es agua potable apta para el consumo humano (WWF 2012). Colombia ocupa el sexto puesto en el ranking mundial de los países con mayor disponibilidad de recursos hídricos renovables tras Brasil, Rusia, Estados Unidos, Canadá y China (Central Intelligence Agency 2011); y el primer puesto en términos específicos por km². No obstante, las perspectivas son preocupantes debido a la presión antrópica desmedida a causa del crecimiento demográfico y a la evolución histórica del sistema de producción capitalista.

En Colombia los mayores demandantes de agua son los sectores agrícola, energético y pecuario quienes demandan el 76.6% del total nacional. El sector minero utiliza el 1.8% de la demanda hídrica nacional, pero teniendo en cuenta que el 82% de la producción de oro es explotación de tipo aluvión (explotación directa sobre el lecho de los ríos) y el 95% de este corresponde a minería sin título minero (UNDOC y Ministerio de Justicia y del Derecho 2016) los riesgos de contaminación y generación de aguas residuales contaminadas con mercurio y cianuro son altos, y pueden tener altos impactos sobre la población.

En este contexto, con el fin de cuantificar el impacto generado sobre el agua por la actividad humana y con los antecedentes de los conceptos de huella ecológica, huella de carbono y agua virtual, surge el concepto de la huella hídrica (Hoekstra y Hung 2002; Wackernagel y Rees 1996) el cual se utiliza principalmente en el estudio de cuencas hidrográficas para la generación de indicadores que permiten mejorar la gestión del agua y la toma de decisiones.

En el “*ENA-Estudio Nacional del Agua 2014*” (IDEAM 2015) se estimó la demanda de agua del sector de minería de carbón y oro en 640.6 millones de m³/año con una proyección de 948.3 millones de m³/año para el 2022. Desafortunadamente, este estudio no aplicó la metodología de la huella hídrica para este sector, siendo solo estimado el

indicador de huella hídrica azul para el subsector minero del petróleo, el cual arrojó un valor 6.6 millones de m³/año (CTA et al. 2015).

Los estudios detallados para el análisis de la huella hídrica minera son escasos en Colombia. Una de las pocas investigaciones existentes fue realizada sobre el municipio minero de Segovia (Antioquia) en donde se estimó un indicador de huella hídrica gris para la actividad aurífera minera del municipio en varios escenarios, arrojando como resultado valores entre 870.45 millones de m³/año hasta 3650.06 m³/año (González Valencia et al. 2012). Estos resultados son preocupantes, debido a que los ordenes de magnitud de los indicadores identifican el fuerte impacto ambiental ocasionado por el proceso minero en las fuentes hídricas.

Por lo anterior, resulta pertinente profundizar en el análisis de la huella hídrica minera, en especial en regiones poco estudiadas y en donde la minera como actividad extractiva intensificada se realiza desde la época de la colonia, como lo es la zona norte del departamento del Cauca. De este modo, el presente estudio realiza una aproximación al cálculo del indicador de huella hídrica, teniendo en cuenta la huella hídrica azul y la huella hídrica gris, para la minería de oro en el municipio del Suarez (Cauca).

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Colombia es uno de los países a nivel mundial con mayor número de conflictos ambientales de acuerdo al Atlas de Justicia Ambiental (EJOLT), siendo la minería, especialmente de oro, la actividad extractiva que explica la mayoría de dichos conflictos debido a modelos de desarrollo económicos extractivos de los últimos gobiernos y al aumento en los precios internacionales del oro que han generado un auge en la explotación sin control de dicho mineral en detrimento del medio ambiente (Pérez-Rincón, Vargas-Morales, y Crespo-Marín 2018).

El agua, junto a la tierra, es el recurso de mayor intensidad de uso en los procesos de extracción minera de oro, debido a que este recurso permite transportar, disolver, concentrar y purificar este metal precioso. En términos técnicos la mayoría de los procesos de extracción y purificación en la minería de oro son de carácter hidro-metalúrgicos. Por lo tanto, es de gran importancia determinar y cuantificar el impacto que ocasiona sobre el medio ambiente, especialmente sobre el recurso hídrico las actividades mineras relacionadas con la extracción de oro.

En la región Pacífico colombiana se encuentra el distrito minero del Tambo-Dovio, que incluye gran parte del departamento del Valle del Cauca y parte del norte del departamento del Cauca. En este distrito se extrae una gran cantidad de productos mineros como la piedra caliza, materiales de construcción, carbón, oro, plata, platino, entre otros (Unidad de Planeación Minero Energética 2005). Específicamente en lo que concierne a la minería de oro, los municipios de Buenos Aires, Santander de Quilichao y Suarez ubicados en el norte del Cauca son los que representan la mayor producción de en el distrito; siendo el municipio de Suarez uno de los municipios con mayor tradición minera desde la época de la Colonia (Buanaventura y Trujillo 2012), en donde la explotación aurífera se sitúa en las inmediaciones de la represa de La Salvajina, el mayor depósito de agua dulce del departamento, y en cercanías del río Cauca, la segunda arteria fluvial del país.

En 2012 la demanda de agua del sector minero representó un 1,8% del uso total de agua del país, siendo la región hidrográfica del Pacífico donde se concentra el 25% del uso de agua en minería (IDEAM 2015). Un indicador biofísico alternativo al uso total de agua es el indicador de huella hídrica, que mide en tres componentes el volumen total de agua dulce consumido por una de unidad específica de producción (Rendón 2015). A pesar de los recientes estudios oficiales publicados sobre el sector hídrico Colombiano (CTA 2013; IDEAM 2015; WWF 2012) para el subsector de la minería aurífera solo existen dos estimaciones locales con esta metodología (González Valencia et al. 2012)(Pardavé y Delvasto 2017).

El bajo número de investigaciones sobre el tema, se explica por las limitaciones metodológicas generadas por la alta incertidumbre y poca disponibilidad en los datos sobre uso del agua en las minas, que dificultan los esfuerzos para llevar a cabo estudios e interpretaciones sobre la huella hídrica de la minería aurífera en Colombia (Baquero 2017).

En este sentido, este trabajo utiliza la metodología de la huella hídrica para la estimación de dicho indicador para la minería aurífera en el Municipio de Suarez (Cauca) tomando como referencia el manual de evaluación de huella hídrica (Hoekstra et al. 2011) y la guía para la evaluación de la huella hídrica de la minería de oro y carbón en Colombia (CTA 2016); con el objetivo de aportar al conocimiento metodológico para la determinación de la huella hídrica como factor de medición, registro y optimización en la utilización del recurso, de cara al fortalecimiento de políticas públicas, estrategias de control y mitigación que generen reducciones al impacto de la actividad minera sobre el medio ambiente, en especial sobre el recurso hídrico.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1 Panorama de la producción aurífera en Colombia

Debido a los diferentes procesos geológicos que formaron desde hace millones de años los valles, cordilleras y costas, se generó una concentración elevada de minerales en la corteza terrestre que cubre el territorio colombiano. Carbón, sal, oro, plata, entre otros minerales han sido extraídos desde épocas precolombinas hasta la actualidad de los diferentes yacimientos a lo largo y ancho del país (MADS - PNUMA 2012).

En el caso específico del oro, la orfebrería era una de las principales actividades de las culturas indígenas originarias de este territorio, quienes fabricaban a partir de dicho mineral variadas piezas como vajillas, adornos y joyas. Posteriormente, durante la conquista y la colonia, los europeos saquearon gran parte de esa riqueza precolombina adicional a nuevas extracciones de mineral, utilizando a los indígenas y esclavos negros africanos para explotar los yacimientos auríferos, contando solamente con la mano de obra, herramientas de hierro y pólvora negra como medios de producción. Durante los primeros tres siglos de la colonia, del actual territorio colombiano se extrajeron entre tres y cuatro toneladas de oro por año que eran enviadas a España (Poveda Ramos 2005).

Durante el siglo XIX, con la llegada de la independencia y la implementación de nuevas tecnologías para el beneficio del mineral, el oro llegó a convertirse en el principal producto de exportación del país, a pesar de que las cantidades extraídas eran menores que en la época de la colonia (Semana 2010). Durante más de la mitad del siglo XX los precios del oro eran fijados por los sistemas monetarios de muchos países que soportaban sus monedas en oro a determinadas tasas fijas; en la figura 1 se observa como el precio del oro permaneció casi constante desde 1940 hasta 1971, año en el que se abandona el patrón oro del dólar. Esta suspensión de la convertibilidad a oro del dólar ocasionó un incremento exponencial en el precio (Cabrera 2014) que generó los incentivos necesarios para que la producción del metal en el país también se viese

aumentada, pasando de 5.8 toneladas de oro en el 1971 hasta 59.2 toneladas de oro en el 2015 (Figura 1.).

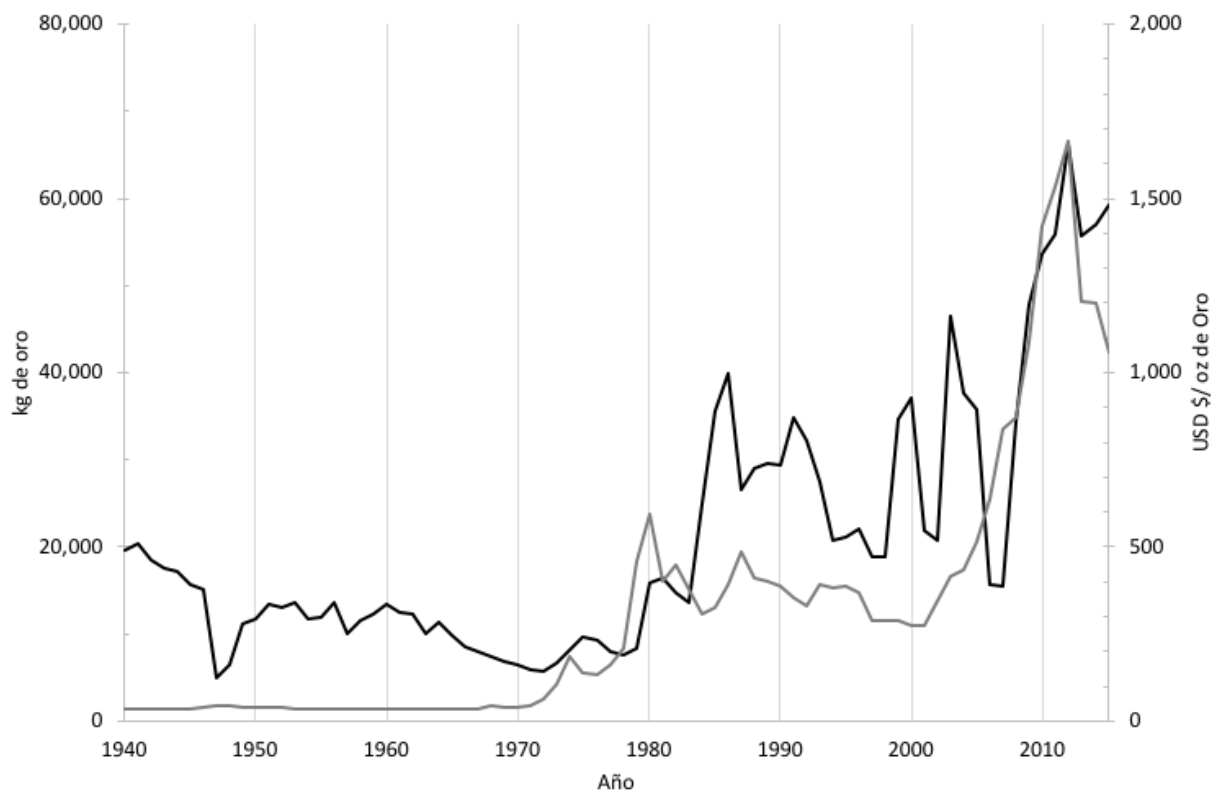


Figura 1. Kilogramos de oro por año producidos en Colombia (-), precio internacional por onza de oro en dólares americanos (USD \$) (-).

Fuente: Elaboración propia. Datos: Unidad de Planeación Minero Energética (2018) y Deutsche Bundesbank (2018).

En la geografía de Colombia se identifican dos tipos de yacimientos de oro de acuerdo con las condiciones geológicas de formación. El 18% de la producción se concentra en yacimientos primarios o de filón, en donde el oro se encuentra depositado en vetas dentro de las formaciones rocosas; estos yacimientos se caracterizan por explotación de tipo subterráneo mediante túneles para el caso de la pequeña minería, o minería a cielo abierto con grandes remociones de tierra para el caso de la gran minería. El otro 82% de la producción se realiza en yacimientos de tipo secundarios o de aluvión, en donde la explotación se realiza a cielo abierto. Con respecto al carácter de legalidad de la explotación, el 77% de las minas de filón censadas en Colombia carecen de titulación;

mientras que el porcentaje en las minas de aluvión es del 95% (UNDOC y Ministerio de Justicia y del Derecho 2016).

En cuanto al nivel tecnológico en el proceso extractivo en Colombia se destacan diferentes niveles, el más básico es la minería de subsistencia de carácter artesanal que corresponde a la extracción de algún mineral mediante métodos rudimentarios, ejercida por personas naturales para generar ingreso de subsistencia. El barequeo es la modalidad más común dentro de la minería de subsistencia, y consiste en el lavado de arenas por medios manuales sin ninguna ayuda de maquinaria o medios mecánicos, con el objeto de separar y recoger metales preciosos contenidos en dichas arenas (Ministerio de Minas y Energía 2015). Su impacto ambiental se considera nulo debido a que no se utiliza ningún compuesto químico en la recuperación del oro y el área explotación (que suele ser a las orillas de los ríos) es baja (UNDOC y Ministerio de Justicia y del Derecho 2016). Según el Ministerio de Minas y Energías de Colombia en este tipo de minería se clasifican las personas naturales que extraen hasta 30 gramos por mes.

El otro nivel tecnológico corresponde a la extracción utilizando maquinaria pesada, el cual agrupa la pequeña, mediana y gran minería. Estos procesos consisten en la remoción de grandes volúmenes de material para la posterior concentración de los metales preciosos contenidos en el material por métodos gravimétricos y químicos, lo que repercute en un mayor impacto ambiental sobre los territorios. De acuerdo con el censo minero del 2011 el 72% de la minería en Colombia se puede catalogar como pequeña minería, el 26% como mediana y solo el 2% como gran minería.

3.2 Panorama de la producción aurífera en el Municipio de Suarez (Cauca)

Hasta 1990, los municipios de Suarez y Buenos Aires (Cauca) constituían un único municipio que cuenta con una historia común de esclavitud y minería desde el siglo XVII. El municipio de Suarez esta ubicado en el suroccidente de colombiano a 1.050 m en promedio sobre el nivel del mar, en el centro-norte del departamento del Cauca (Figura 2). Limita al norte y oriente con el municipio de Buenos Aires, al Suroriente y al Sur con

el municipio de Morales y al Occidente con el municipio de López de Mica (Wikipedia: The Free Encyclopedia 2017).



Figura 2. Ubicación geográfica del municipio de Suárez, Cauca (Colombia)

Fuente: (Wikipedia: The Free Encyclopedia 2017)

El municipio de Suárez está constituido por una importante riqueza hidrográfica, ya que es atravesado por el río Cauca y en su territorio está ubicada la represa de la Salvajina, que fue construida en los años 80 con el fin de generar energía y regular las aguas del río Cauca.

Adicionalmente, su territorio ha sido espacio de minería de oro desde aproximadamente 1636, año de la llegada de los primeros asentamientos de esclavos a las minas del territorio controladas por la comunidad religiosa de los Jesuitas. Posteriormente con la liberación de los esclavos en el siglo XIX, la comunidad local compra las minas y comienza a explotar de forma individual los diferentes yacimientos de oro. A principios del siglo XX, con la construcción del ferrocarril inicia la llegada de multinacionales al territorio, como la Asnazú Golden Company con licencia para dragar el río Cauca y que según fuentes locales logró extraer alrededor de 2.400 toneladas de oro del río a razón de 68 toneladas por año durante 35 años, valores que no concuerdan con los registros oficiales.(Buanaventura y Trujillo 2012; Molano Bravo 2017)

Cabe anotar que los asentamientos que se construyeron alrededor de la estación del ferrocarril, en parte para satisfacer las necesidades de los trabajadores de la compañía Asnazú Golden Company, marcaron el inicio de la formación de la cabecera municipal de Suarez como se conoce actualmente.

En la primera década del siglo XXI, el municipio fue noticia nuevamente por el interés de las multinacionales AngloGold Ashanti y Cosigo Resources de realizar explotación en un mega proyecto minero en el territorio. Sin embargo, la presión de las comunidades ha logrado mantener al margen dicho proyecto, a pesar de que las compañías lograron hacerse con el poder de títulos mineros que aun poseen (Leah Temper, Bene, y Alier 2015).

Desde el punto de vista geológico el stock de Pasobobo-Damian en Suarez (Cauca) tiene depósitos hidrotermales asociados con pórfidos de cobre y oro de composición dacítica y andesítica (Calco-alcalinos) emplazados en rocas basálticas de afinidad oceánica (Servicio Geológico Colombiano 2012). Las zonas de explotación de aluvión se encuentran en las cuencas y microcuencas del río Cauca, Ovejas, Maraveles, La Estrella, Inguito y la quebrada San Miguel. Mientras que las zonas donde se explotan el oro de filón están ubicadas en las veredas Matrecaña, Tamboral, Maraveles del corregimiento de La Toma (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006b).

La operación tradicional para la extracción del oro en el municipio es la gravimétrica en molinos de piones, concentración por canalones y refinación por bates (Servicio Geológico Colombiano 2012). De acuerdo a la historia minera en el municipio se explotó la minera de filón primordialmente hasta finales del siglo XX, concentrándose en el área de Paso Bobo y por procesos erosivos a través del tiempo ha permitido el origen de aluviones auríferos en los cauces de los ríos y quebradas, donde se realiza extracción de oro a nivel de minería de subsistencia, mediante barequeo o mazamorreo (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a).

En la figura 3, se observa el comportamiento de los registros oficiales de producción de oro en el municipio desde el año 2001 hasta el año 2015, en donde se observa una tendencia de crecimiento que concuerda con la fuerte subida del precio internacional del oro desde año 2001 hasta su pico en el año 2012, la posterior caída en precio internacional parece haber afectado los últimos años con una menor producción del metal (Figura 3). La caída en la producción del año 2010 puede ser explicada por la decisión tomada en el 2009 de la compañía AngloGold Ashanti de abandonar todos los proyectos de la zona.

La producción oficial en Suarez en el periodo comprendido entre el año 2001 hasta el año 2015 fue de 3.6 toneladas de oro, ubicando al municipio en el tercer lugar del departamento del Cauca, detrás de Buenos Aires con 5.6 toneladas y Timbiqui con 6.3 toneladas.

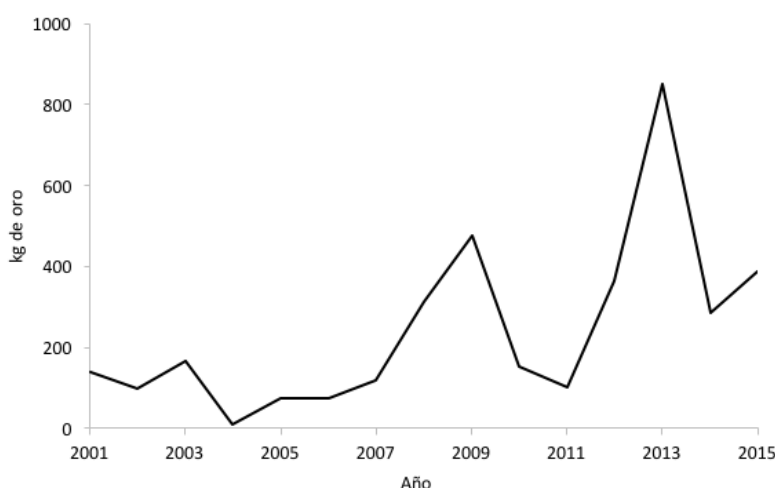


Figura 3. Kilogramos de oro por año producidos en el municipio de Suarez, Cauca (Colombia) (-).

Fuente: Elaboración propia. Datos de Unidad de Planeación Minero Energética (2018).

3.3 Huella hídrica

La huella hídrica es un concepto introducido por Hoekstra y Hung (2002) que permite la creación de un indicador de sostenibilidad para identificar las relaciones causa-efecto entre actividades socioeconómicas y la degradación del recurso hídrico. Orientando los resultados a generar un cambio en la construcción del discurso, la apropiación de conceptos básicos por parte de los grupos sociales influyentes; y por último, derivar una

transformación de prácticas cotidianas asociadas a la relación agua-hombre.(Arevalo, Lozano, y Sabogal 2011)

El indicador de huella hídrica está conformado por tres indicadores representados por los colores verde, azul y gris, que según la guía “*Aproximación a la Evaluación de la Huella Hídrica de la minería de oro y carbón en Colombia*” (2016) se definen como:

- Huella hídrica verde: corresponde al consumo de agua que esta almacenada en el suelo y que retorna al sistema. Por tratarse de un tema asociado a procesos agrícolas o forestales, no se tiene en cuenta para el cálculo de la huella hídrica minera.
- Huella hídrica azul: es la cantidad de agua superficial y/o subterránea extraída de una unidad territorial para satisfacer una necesidad antrópica y que no retorna al mismo sistema.
- Huella hídrica gris: es el volumen de agua dulce necesario para asimilar la carga de contaminantes por parte de un cuerpo receptor, tomando como referencia las normas de calidad ambiental, asociando los limites establecidos a una calidad buena para el ambiente y para las personas.

La evaluación de la huella hídrica no se limita a la estimación de un valor numérico de un indicador, generalmente expresado en metros cúbicos de agua por kilogramo de producto o metros cúbicos de agua por año; por el contrario, es un análisis complejo que se compone de las siguientes cuatro fases:

- I. Definición del alcance del estudio: ubicación geográfica, tipos de productos, tipo huella hídrica a medir, y definición de los límites del estudio.
- II. Cuantificación de la huella hídrica.
- III. Análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica.
- IV. Formulación de estrategias frente a los resultados de huella hídrica.

3.4 Proceso de extracción de oro

En general en Colombia, la extracción, explotación y concentración de oro (Figura 4) se realiza por una combinación de las siguientes etapas: concentración de mineral, amalgamación (mercurio), lixiviación con cianuro y precipitación o deposición del oro sólido. La primera etapa de concentración consiste en la trituración, molienda y clasificación gravimétrica o por flotación del material previamente removido del río (en los yacimientos de aluvión) o de las cuevas o galerías (en los yacimientos de filón), en esta primera etapa también se puede extraer parte del oro metálico que se encuentra en forma de granos o partículas sólidas relativamente grandes. Posteriormente dependiendo de la tecnología de la mina, se puede proceder a la etapa de amalgamación con mercurio o a la etapa de lixiviación con cianuro.

El mercurio es mezclado con el mineral concentrado, formando una amalgama (aleación de mercurio con otros metales, en este caso con oro y la plata), que se puede separar fácilmente del resto del material. Posteriormente, se quema la amalgama con el fin de evaporar el mercurio y recuperar el oro y la plata en su forma metálica. Este proceso representa una alta ineficiencia, debido a que solo es recuperada una fracción de oro de alrededor del 30% del potencial de oro a extraer. En pequeña minería, los dueños de los entables o sitios de beneficio de oro suelen retener los desechos de la amalgamación como parte de pago de los mineros por el uso de los equipos, estos desechos o “colas” son posteriormente cianurados para extraer el oro remanente. (Veiga, Angeloci-Santos, y Meech 2014)

La amalgamación con mercurio es un proceso que esta prohibido en Colombia debido al carácter tóxico y bio-acumulable de este metal pesado que genera daños en el cerebro, los riñones, los testículos, déficit en el desarrollo neurológico y de comportamiento, daños sutiles en la memoria visual, atención y en la velocidad en las respuestas visuales, déficit de atención, daños auditivos y psicomotores, inflamación severa en la piel, irritación del tracto gastrointestinal, daño hepático severo, parálisis progresiva y generalizada de las extremidades, entre otros problemas (Contraloría General de la República 2013). La ley 1658 de 2013 y la suscripción al convenio de Minamata por parte de Colombia en marzo

de 2018, tienen el compromiso de la eliminación programada del mercurio en la minería para el año 2018 y en las diferentes actividades industriales para el año 2023.

Por otro lado, la etapa de lixiviación con cianuro, comúnmente llamada cianuración consiste en disolver el oro metálico en forma de complejo oro-cianuro permitiendo así separarlo de las arenas, rocas y resto de minerales. Posteriormente se pueden utilizar dos técnicas para revertir el proceso en la solución líquida, convirtiendo de nuevo el oro desde su forma de complejo oro-cianuro concentrado a oro metálico. La primera consiste en la precipitación de oro metálico promovida por la adición de zinc, técnica que se utiliza ampliamente en Colombia; y la segunda es la electrodeposición de oro en una celda electrolítica que requiere otros procesos de concentración previa y mayor grado tecnológico, y aunque esta tecnología es la más utilizada a nivel mundial, en Colombia no es aplicada. (Wai, Eugene, y Mujumdar 2009)

Los procesos de cianuración por su parte, también constituyen un riesgo para el medio ambiente y la salud humana, debido a que el cianuro inhibe la transferencia de oxígeno a las células y provoca sofocación. Asimismo, el cianuro inhibe la enzima citocromo oxidasa bloqueando el transporte de electrones y la liberación de energía celular (Kuyucak y Akcil 2013)

En general y de acuerdo con los procesos planteados, las aguas residuales de la industria aurífera se pueden clasificar en los siguientes tipos de aguas: Aguas con mercurio debido a arrastre de la amalgama, mercurio elemental y otros compuestos químicos formados con mercurio durante el proceso; aguas ácidas, productos de la disolución de metales y otros compuestos arrastrados por aguas lluvias en las pilas de excavación, escombros, entre otros. Y aguas cianuradas residuales del proceso de precipitación con zinc.

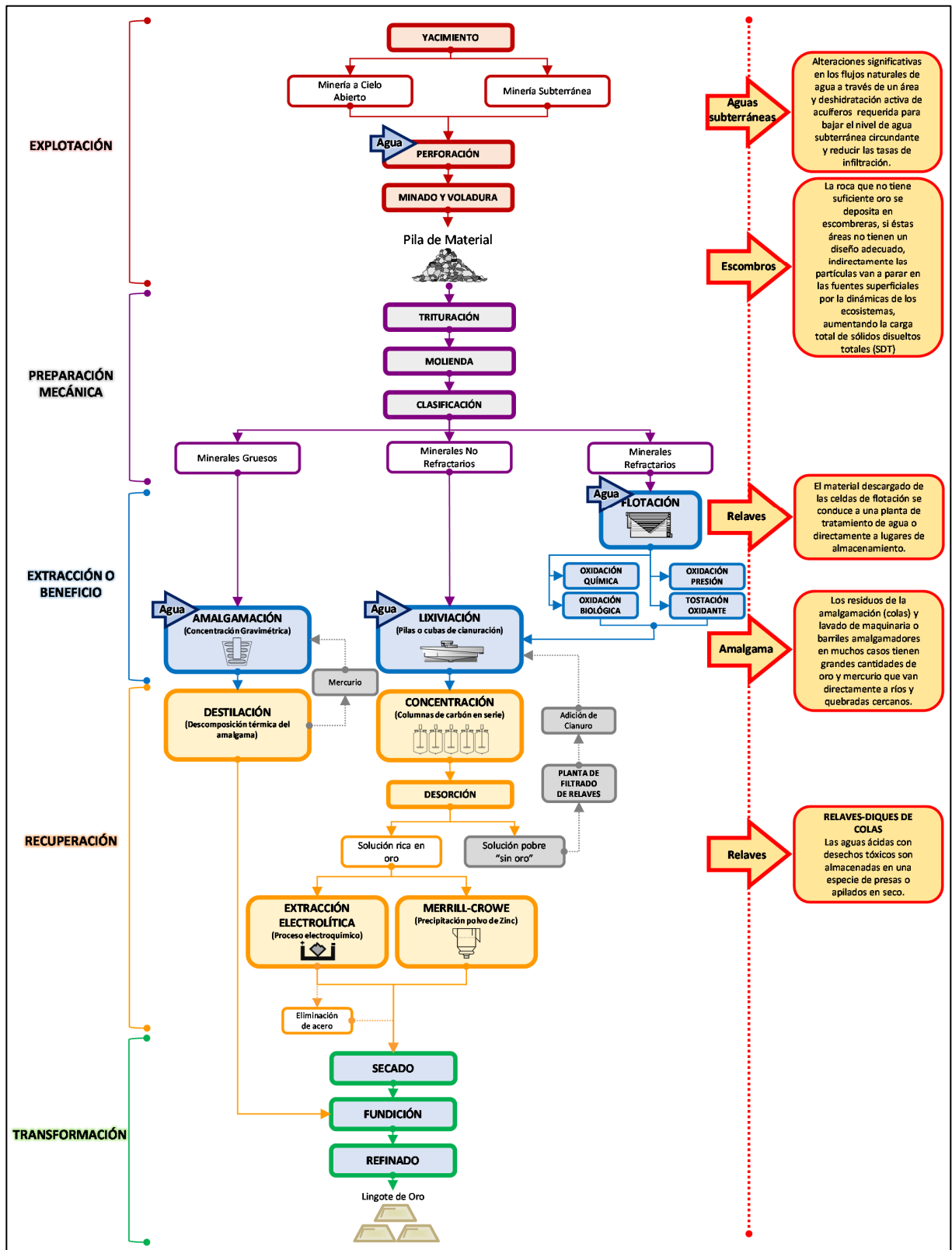


Figura 4. Rutas de procesamiento en la extracción de Oro en Colombia.

Fuente: Baquero (2017)

4. ANTECEDENTES

En el 2002 Hoekstra y Hung introdujeron el concepto de huella hídrica tomando como base los conceptos de huella ecológica, huella de carbono y agua virtual (Rendón 2015) y llevaron a cabo el primer estudio de las huellas de agua para algunos productos agrícolas en un grupo extenso de países en marco de un análisis del comercio internacional. Posteriormente, Hoekstra y Chapagain (2008) introducen el concepto de la huella hídrica verde, azul y gris como lo conocemos actualmente; y en ese mismo año se crea la Water Footprint Network (WFN) que tiene como objetivo coordinar entre empresas, instituciones e individuos para la evaluación y difusión de la metodología de la huella hídrica aplicada en productos, empresas, sectores y países, buscando como objetivo proporcionar soluciones prácticas basadas en la ciencia y puntos de vista estratégicos que permitan a las empresas, los gobiernos, las personas y los pequeños productores transformar la forma en que se usa el agua dulce. Del trabajo conjunto entre la Water Footprint Network, sector público y privado entre el 2008 y el 2011, se publicó un manual que establece la metodología estándar global para la evaluación de la huella hídrica (Hoekstra et al. 2011).

En Colombia el concepto de huella hídrica se vio fortalecido por el desarrollo del proyecto piloto SuizAgua Colombia en el año 2010, cuyo objetivo fue la generación y difusión de conocimiento sobre la metodología de la huella hídrica, para la toma de decisiones de responsabilidad social y ambiental alrededor del agua (Embajada de Suiza en Colombia 2017). En el marco de dicho proyecto, se realizó la evaluación de huella hídrica en la cuenca del río Porce en 2012, en donde se determinó la cantidad de agua dulce requerida, directa o indirectamente, por los principales sectores económicos de la región (agropecuaria, industrial, doméstico, energético y minero) (CTA 2013).

Como parte del proyecto en la cuenca del río Porce en 2012 (CTA 2013), se realizó una aproximación a la estimación de la huella hídrica de la minería del oro en el municipio de Segovia (Antioquia) dando como resultado una huella hídrica azul promedio de 58,7 m³ de agua por kg de oro y una huella hídrica gris por mercurio de entre 870.45 millones de

m³/año hasta 3650.06 millones de m³/año, valores que resultan preocupantes si se tiene en cuenta que la huella hídrica agrícola (sector de mayor demanda de agua) en todo el departamento de Antioquia fue calculada en 206.62 millones de m³/año (González Valencia et al. 2012).

También en el año 2012, se desarrolló una investigación enfocada en el análisis del sector agrícola Colombiano desde la metodología de la huella hídrica en donde se identifican productos como el café, la palma africana, el arroz, el maíz y la caña de azúcar como productos agrícolas altamente demandantes de agua y agroquímicos, con una relevante contribución a la huella hídrica azul y gris del sector (WWF 2012).

En el “*ENA - Estudio Nacional del Agua 2014*” (IDEAM 2015) se incluyó por primera vez en un estudio de esta envergadura en el país los conceptos asociados a la huella hídrica. Dos publicaciones adicionales que se derivaron a partir del este estudio, las cuales profundizaron en el concepto de huella hídrica, la primera fue la “*Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia*” (CTA et al. 2015) y segunda fue la “*Guía para la elaboración del programa de uso eficiente y ahorro del agua en la minería de metales preciosos y carbón*” (Unidad de Planeación Minero Energética 2015). En estas investigaciones los análisis de huella hídrica minera se concentraron únicamente en el proceso de extracción de petróleo, debido a la poca disponibilidad de información en los subsectores asociados con los otros tipos de minería.

Los anteriores informes identificaron al sector minero como uno de los puntos focales en donde se debe explorar la aplicación de la metodología de la huella hídrica. A raíz de esto, en el año 2016 se publicó el “*Manual para la aproximación a la evaluación de la huella hídrica de la minería de oro y carbón en Colombia de la Unidad de Planeación Minero Energética*” (UPME, 2016) que sirve como base metodológica y proporciona herramientas para el análisis de la actividad minera bajo el enfoque de la huella hídrica, logrando establecer los lineamientos técnicos básicos para la realización de este tipo de análisis en el sector.

Por otro lado, Haggard (2015) realizó el cálculo de la huella hídrica de una mina de platino en Sudáfrica, en donde se utilizan procedimientos similares a la minería aurífera, encontrando una huella hídrica total por kilogramo de platino de 806 m³, de los cuales 228 m³ corresponden a la huella hídrica azul y 578 m³ a la huella hídrica gris. Por otro lado, Pardavé y Delvasto (2017) estimaron para la mina “Reina de Oro” en Vetas, Santander (Colombia) una huella hídrica azul 21.79 m³ de agua por kg de oro, esta mina no utiliza procesos de amalgamación por mercurio o cianuración, por lo que los autores atribuyeron una huella hídrica gris de cero.

Baquero (2017) realizó un análisis sobre la aplicabilidad del concepto de huella hídrica en la minería aurífera, en donde identifican una serie de limitaciones para la aplicabilidad de la huella hídrica en la industria minera como la baja disponibilidad y alta incertidumbre de los datos, y la dificultad en la cuantificación de eventos anormales en el proceso minero. Sin embargo, la autora asegura que estas limitaciones representan oportunidades significativas para el desarrollo de investigación en pro de mejorar metodológicas que permitan obtener valores de huella hídrica más representativos.

5. METODOLOGÍA

La metodología de este estudio está basada en las cuatro fases descritas en el manual para la determinación de la huella hídrica (Hoekstra et al., 2011), mencionadas en la sección 3.3. La primera fase, en donde se delimita el alcance y los objetivos de la investigación, se presenta en esta sección. Es importante resaltar que el producto final del presente estudio es la evaluación de la huella hídrica de la minería de oro en el municipio de Suarez (Cauca).

5.1 Alcance Geográfico

El alcance geográfico del estudio se delimitó a la zona de explotación minera aurífera del municipio de Suarez (Cauca) que cubre un área aproximada de 120 km² (Lopez 2006). Geográficamente esta ubicado sobre la cordillera occidental, paralelo al cause del río Cauca, el río Ovejas y la represa de la Salvajina (figura 5).



Figura 5. Mapa político del municipio de Suarez (Cauca)
Adaptado de la pagina web de la Alcaldía de Suárez - Cauca (2014)

Debido a la poca disponibilidad de la información, los datos reportados en el presente estudio se basan especialmente en minas de los corregimientos de Mindala y La Toma del municipio de Suarez (Cauca), en donde la explotación de oro se realiza principalmente en yacimientos de filón. Para el caso de la minería de aluvión se utilizaron datos de los yacimientos en el río Ovejas, río Cauca, río Inguitó, Quebrada Saladito y Quebrada San Martín. (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a; Lopez 2006; Servicio Geológico Colombiano 2012)

5.2 Alcance Temporal

La información recopilada incluye datos desde el año 2001 hasta el año 2015. Se trabajó al menor nivel de agregación temporal de información disponible (días) para realizar los cálculos básicos. Los valores de los indicadores finales se calcularon en unidad temporal anual agregando los valores.

5.3 Estimación de los Indicadores de Huella Hídrica

Los indicadores se calcularon con los flujos de agua y cantidades de contaminante estimados a partir de un inventario que incluye las plantas de beneficio para la extracción de oro en minería de filón y los lugares de extracción de oro de aluvión en el municipio de Suarez (cauca). Este inventario se construyó con las fuentes de información descritas en la sección 5.4. La información del inventario permitió construir un escenario base en donde se logró estimar una producción de 328.5 kg de oro puro por año, valor que se encuentra dentro del rango de producción oficial en el periodo de análisis (años 2001 a 2015), en donde hay un máximo de 850 kg/año y un mínimo de 10 kg/año, con una media de 241 kg/año; de igual forma permite caracterizar la producción aurífera del municipio y calcular los indicadores de huella hídrica por kg de oro producido. Para la estimación de los indicadores en el periodo de análisis (2001-2015) se utilizaron los indicadores calculados en el caso base y se multiplicaron por la producción de kg de oro por año.

5.3.1 Huella hídrica azul (HHA)

La HHA es el consumo de agua que se utiliza para un proceso o producto. Para realizar este cálculo se procedió con un balance de las entradas y salidas de agua de la mina. Considerando que la diferencia en el volumen de agua a la entrada y salida de la mina corresponde a la evaporación y/o incorporación de agua en el producto. Las ecuaciones 1 y 2 indican los indicadores a calcular.

$$HHA = Agua_{in} - Agua_{out} \quad (1)$$

$$Indicador\ HHA = \frac{HHA}{Producción} \quad (2)$$

$Agua_{in}$: Sumatoria total de agua entrante al proceso (acueducto, subterránea, superficial, lluvia) en m³/año

$Agua_{out}$ Sumatoria de vertimientos totales de agua en el proceso en m³/año

$Producción$: kg de oro producidos por unidad de análisis (Zona, Mina, Municipio, etc).

5.3.2 Huella hídrica gris (HHG)

La HHG representa el volumen necesario para diluir un contaminante presente en los vertimientos del proceso hasta un valor que garantice la calidad del agua en el cuerpo de agua receptor. El indicador se calcula de acuerdo con la ecuación 3 y 4.

$$HHG = \frac{Caudal_{out} * Concentración_{out} - Caudal_{in} * Concentración_{in}}{Concentración_{max} - Concentración_{nat}} \quad (3)$$

$$Indicador\ HHG = \frac{HHG}{Producción} \quad (4)$$

En donde:

$Caudal_{out}$: Caudal de salida o de vertimiento de la mina en m³/año.

$Concentración_{out}$: Concentración de un parámetro a la salida de la mina en g/m³.

$Caudal_{in}$: Caudal de entrada a la mina en m³/año.

Concentración_{in}: Concentración de un parámetro a la entrada de la mina en g/m³.

Concentración_{max}: Concentración máxima permisible del contaminante para mantener en buenas condiciones la calidad del afluente receptor del vertimiento en g/m³.

Concentración_{nat}: Concentración natural del contaminante (sin intervención antrópica) en g/m³.

Para el caso de contaminantes como el cianuro o el mercurio, que no vienen en el agua de entrada a la mina y que todo vertimiento es debido a la actividad que se realiza dentro de la mina, se puede calcular la HHG a través de la siguiente modificación a la ecuación (3):

$$HHG = \frac{Vertimiento}{Concentración_{max}} \quad (5)$$

En donde:

Vertimiento: Cantidad de contaminante vertido en el efluente de la mina g/año.

5.4 Tipo de Información

La base de información utilizada para la investigación fue información secundaria consultada en el Sistema de Información Minero Colombiano (Unidad de Planeación Minero Energética 2018) fuente oficial de estadísticas del sector minero. Igualmente, informes del Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Servicio Geológico Colombiano 2012), antiguo Ingeominas, de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006b, 2006a; Lopez 2006) y de otras organizaciones nacionales (MADS - PNUMA 2012; UNDOC y Ministerio de Justicia y del Derecho 2016), fueron utilizados.

No fue posible recolectar información en campo debido a la informalidad del sector, sumada a los problemas de transporte y orden público de la zona. Por lo tanto, con los datos obtenidos se procedió a realizar un análisis con dos escenarios probables, debidamente justificados, basado en la metodología presentada por González Valencia et al. (2012)

Es importante resaltar la incertidumbre y las limitaciones de este estudio debido a los supuestos que fue necesario realizar y a la escasa información sobre el sector minero en la zona. A continuación, se describe la forma en la que se estimaron cada uno de las variables e indicadores utilizadas en el estudio:

Capacidad Molienda (ton/día): En las plantas de extracción de los yacimientos de filón se calculó el número de toneladas por día de material molido o de entrada a la mina, teniendo en cuenta que 1 pisón tiene una capacidad de molienda de 2.5 ton/día y 1 barril de 0.4 ton/día (MADS - PNUMA 2012). Con excepción de la mina de Jose Ibarra El Desquite en donde se utilizó el volumen del tanque de cianuración para estimar la capacidad de molienda (en cianuración el 30% es mineral y 70% es agua (Lopez 2006) y la mina de William Benavides donde se utilizó el valor de capacidad de molienda reportado en el informe del Servicio Geológico Colombiano del año 2012 y que se encuentra en el rango de la mediana minería.

En el caso de los yacimientos de aluvión se utilizaron los datos de la (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a) en donde se reporta los gramos de oro extraídos por día para cada lugar, y se calculó el número de toneladas procesadas (capacidad de molienda en este caso) dividiendo este valor por el tenor promedio (cantidad de oro respecto a la masa total extraída) 10 g de oro por tonelada (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a) para estos yacimientos y la eficiencia en la extracción. Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en ton/año. Se consideraron 244 días hábiles al año para los cálculos anuales.

Producción de oro Ley 750 (g/día): La cantidad de oro extraído con una pureza del 75% (calidad que produce en promedio la pequeña y mediana minería), se calculó multiplicando la capacidad de molienda de cada mina por el tenor promedio, que para yacimientos de aluvión es de 10 g/ton y para filón 15 g/ton (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a). El valor resultante se multiplicó por la capacidad de recuperación promedio de cada tipo de beneficio (tabla 1). Para el caso de minas con

más de un tipo de beneficio se calculó el porcentaje de recuperación acumulado teniendo en cuenta la recuperación promedio local de cada etapa (tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de recuperación de oro por tipo de beneficio aplicado.

% de Recuperación	Tipo de beneficio			Recuperación acumulada		
	Conc. Gravimétrica (1)	Amalgamación (2)	Cianuración (3)	Conc. Gravimétrica + Amalgamación	Amalgamación + Cianuración	Conc. Gravimétrica + Cianuración
	45.0%	30.0%	89.5%	61.5%	92.7%	94.2%

Fuentes: (1) (Lopez 2006) (2) (Servicio Geológico Colombiano 2012) (3) (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a)

En el caso de los yacimientos de aluvión se utilizaron los datos de la Corporación Autónoma Regional del Cauca (2006a) en donde se reporta los gramos de oro extraídos por día para cada lugar. Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en kg/año.

Producción de oro Ley 999 (g/día): La cantidad de oro reportada en los registros oficiales del Sistema de Información Minero Energetico (Unidad de Planeación Minero Energética 2018) corresponden a oro puro Ley 999 (99.9% de pureza), para realizar la conversión de Ley 750 a Ley 999, se multiplica la cantidad de oro Ley 750 por el factor de conversión 0.75. Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en kg/año.

Agua in (m³/día): El caudal de entrada a la mina se estimó multiplicando los consumos específicos de agua que requiere cada tipo de beneficio (tabla 1) por las toneladas molidas en cada mina. Para plantas con más de un tipo de beneficio se suma el consumo en cada etapa, debido a que son independientes y se requiere agua fresca en cada etapa; por ejemplo, el agua de salida de la concentración gravimétrica no se puede reutilizar directamente en la etapa de cianuración debido al alto porcentaje de solidos que trae.

Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en m³/año.

Tabla 2. Consumo de agua por tipo de beneficio

	Tipo de beneficio		
	Conc. Gravimétrica (1)	Amalgamación (2)	Cianuración (3)
Entrada de agua m ³ /ton	6.0	0.3	2.3

Fuentes: (1) (Lopez 2006) (2) (Servicio Geológico Colombiano 2012) (3) (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a)

Agua out (m³/día): El caudal de salida o de vertimiento se calculó teniendo en cuenta que para los diferentes tipos de beneficio gran parte de las aguas de proceso son retornadas a la fuente natural de agua de donde se captan, y existe un porcentaje de agua que no retorna quedando contenida en la humedad de los lodos y arenas procesadas en las minas de filón. Estas arenas se acumulan en pilas con un contenido de agua entre 9-17% (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a; Lopez 2006; Pardavé y Delvasto 2017) para el cálculo del agua que se retiene en el proceso productivo se utilizó el valor del 17%. No se tuvo en cuenta otros procesos evaporativos durante el proceso extractivo porque se consideran despreciables.

Para las minas de aluvión donde las arenas y lodos procesadas son vertidos de vuelta al río, se consideró que el caudal de agua de salida es igual al de entrada. Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en m³/año.

HHA (m³/día): El cálculo de la HHA para cada planta de procesamiento o lugar de explotación se realizó con la ecuación 1. Los valores de cada planta fueron sumados para calcular el indicador de HHA en m³/año y la HHA por kg de oro producido de acuerdo con la ecuación 2.

Hg usado: En el proceso de amalgamación de minería de filón se utilizan un promedio de 27.5 gramo mercurio (formula química: Hg) por gramo de oro recuperado (MADS - PNUMA 2012)

Para los yacimientos de aluvión se utilizó el valor reportado de uso de 20.0 g de mercurio por gramo de oro recuperado con el método de extracción con retroexcavadoras y

beneficio por amalgamación en canalones con flujo abierto (MADS - PNUMA 2012). Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en kg/año.

Vertimiento Hg Metodología 1: La metodología 1 tuvo en cuenta el estudio de Ruíz Solano (2016) en donde se caracterizaron los vertimientos y se realizó un balance de materia para el mercurio en una planta de pequeña minería de filón en donde se extrae oro por medio del proceso de amalgamación en ciclo semi-cerrado en el departamento del Cauca. En dicho estudio se estimó un vertimiento en el efluente líquido del 3.38% del mercurio utilizado en cada ciclo. Igualmente existen pérdidas por volatilización del 1.64% del mercurio inicial en cada ciclo que se evapora durante la quema de la amalgama y constituye una fuente de contaminación atmosférica (no se incluyó en el cálculo de vertimiento, debido a que solo se tiene en cuenta los vertimientos líquidos).

Para los yacimientos de aluvión se utilizó el valor reportado de 0.31 g de mercurio liberados al suelo, atmósfera o agua por gramo de oro recuperado en minas de aluvión en ciclo semi-cerrado para la zona minera de los municipios de Buenos Aires y Suarez (MADS - PNUMA 2012). Ese valor se corrigió multiplicándolo por un factor del 66% teniendo en cuenta que del total de las emisiones de mercurio aproximadamente un 66% corresponde al vertimiento en el efluente líquido (Ruíz Solano 2016).

Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en kg/año. Adicionalmente se calculó el HHG teniendo en cuenta solo el vertimiento de mercurio estimado en la metodología 1 (HHG solo Hg) en m^3/kg de oro y en $\text{m}^3/\text{año}$ utilizando las formulas 4 y 5. La concentración máxima permisible de vertimiento de mercurio es de 0.002 mg/l para la actividad de extracción de oro, según la resolución 0631 del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Vertimiento Hg Metodología 2: Para los yacimientos de filón se utilizó el valor reportado de 7.7 g de mercurio liberados al suelo, atmósfera o agua por gramo de oro recuperado en ciclo abierto para la zona de minera de los municipios de Buenos Aires y Suarez (MADS - PNUMA 2012). Ese valor se corrigió multiplicándolo por un factor del 66%

teniendo en cuenta que del total de las emisiones de mercurio aproximadamente un 66% corresponde al vertimiento en el efluente líquido (Ruíz Solano 2016).

Para los yacimientos de aluvión se utilizó el valor reportado de 15.5 g de mercurio liberados al suelo, atmósfera o agua por gramo de oro recuperado en minas de aluvión en ciclo abierto para la zona de minera del municipio de Suarez (MADS - PNUMA 2012). Ese valor se corrigió multiplicándolo por un factor del 66% teniendo en cuenta que del total de las emisiones de mercurio aproximadamente un 66% corresponde al vertimiento en el efluente líquido (Ruíz Solano 2016).

Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en kg/año. Adicionalmente se calculó el HHG teniendo en cuenta solo el vertimiento de mercurio estimado en la metodología 2 (HHG solo Hg) en m^3/kg de oro y en $\text{m}^3/\text{año}$ utilizando las formulas 4 y 5. La concentración máxima permisible de vertimiento de mercurio es de 0.002 mg/l para la actividad de extracción de oro, según la resolución 0631 del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

CN usado: Según la Evaluación Minero-Ambiental del Distrito Minero de Suarez (Lopez 2006) en el proceso de cianuración de minería de filón se utilizan un promedio de 1.5 a 6.0 kg de cianuro de sodio por m^3 de solución (CN por la formula química del ion cianuro). Para el cálculo del uso de CN se utilizó el valor promedio de 3.75 kg de cianuro de sodio por m^3 de solución. Este valor se multiplicó por el volumen en m^3 de los tanques de cianuración de cada planta. Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en kg/año.

Vertimiento CN: Análisis de cianuro en las soluciones pobres de cianuración de tres plantas de procesamiento de mineral en los municipios de Buenos Aires y Suarez (Cauca) arrojaron que en promedio este efluente tenía una concentración de cianuro libre de 1.5 g/l. Se estableció este valor como el de la concentración del efluente de descarga, lo que significa que un 40% del cianuro es eliminado de la mina por el efluente líquido.

Los valores de cada planta fueron sumados y se calculó el valor anual en kg/año. Adicionalmente se calculó el HHG teniendo en cuenta solo el vertimiento de cianuro (HHG solo CN) en m³/kg de oro y en m³/año utilizando las formulas 4 y 5. La concentración máxima permisible de vertimiento de cianuro es de 1 mg/l para la actividad de extracción de oro, según la resolución 0631 del Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible.

HHG Metodología 1 y Metodología 2: Para el cálculo de la HHG de cada planta de procesamiento o lugar de explotación se consideró que los vertimientos de CN más los de Hg (Metodología 1 o Metodología 2) se realizaron en efluentes independientes incluso si una mina tenía ambos procesos de cianuración y amalgamación. Los valores de cada planta fueron sumados para calcular el indicador de HHG en m³/año y la HHG por kg de oro producido.

5.5 Análisis de Datos y Propuestas

Para realizar el análisis de los datos se analizó de forma comparativa la huella hídrica del sector minero frente a otros usuarios del agua en diferentes zonas hidrográfica. Este análisis permite tener una mirada integral bajo el contexto específico ambiental, económico y social asociado a las características del área geográfica y sus cuencas. Con la información se procedió a realizar formular estrategias y propuestas para el sector.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el inventario de las plantas de procesamiento del mineral se lograron identificar 24 plantas o lugares de procesamiento, de los cuales 19 corresponden a plantas ubicadas en los yacimientos de filón y 6 son lugares explotación de mineral de aluvión (tabla 3). Es preciso señalar que 12 plantas de procesamiento estaban basadas exclusivamente en la recuperación gravimétrica de oro, 4 plantas utilizaban el método de amalgamación y 4 el de cianuración. Para la explotación de mineral de aluvión se consideró que la extracción se realizó con mini dragas o retroexcavadoras; la trituración y clasificación se realizó de forma manual sin ayudas mecánicas, y el refinamiento del oro se realizó por técnica artesanales de barequeo (concentración gravimétrica) y amalgamación con mercurio en canales o baldes.

En la tabla 4 se presenta el escenario base con los valores estimados de los diferentes consumos e indicadores relevantes para la investigación. Es importante destacar el porcentaje de producción de oro del municipio según el tipo de yacimiento estimado para el escenario base, que fue de 97.7% para filón y 2.3% para la minería de aluvión. Estos valores difieren del estudio del MADS - PNUMA (2012) en donde se reporta que para el departamento del Cauca un 47% de la producción es de minería de filón y un 53% es de aluvión. Sin embargo, en el 2016 la UNDOC y el Ministerio de Justicia y del Derecho con la ayuda de imágenes satelitales y otras herramientas de teledetección, cuantificaron las hectáreas afectadas por minería de aluvión en el país, encontrando que el departamento del Cauca tiene la menor afectación de área dentro de los 7 departamentos productores de oro en Colombia. Según los autores esto puede obedecer, entre otras razones, a que el oro no siempre se registra en la zona de donde es extraído y a la incidencia de la minería de filón que no produce evidencias de actividad registrables por teledetección. En efecto, según diferentes estudios en el municipio de Suarez la actividad minera que se desarrolla mayoritariamente es la explotación subterránea de oro de filón lo que explica que sea este el tipo de producción dominante en el municipio (Buanaventura y Trujillo 2012; Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a; Lopez 2006).

Tabla 3. Inventario de las plantas de procesamiento del mineral para los yacimientos de filón y lugares explotación de mineral para los yacimientos de aluvión del municipio de Suarez (Cauca).

Planta de procesamiento o lugar de explotación	Fuentes	Tipo de yacimiento	Trituración (1: Existente)		Molienda (# de equipos)		Tipo de beneficio (1: Existente)			Tanque arenas cianuración
			Manual	Mecanica	Pisones	Barriles	Conc. Gravimetrica	Amalgamación	Cianuración	m3
Joseías Lucumí (La Toma)	1,3	Filón	1	0	0	1	0	1	0	0
Molino de la Coop. (La Toma – El Carmen)	1,3	Filón	1	0	4	1	1	0	0	0
Freddy Borja (La Toma - El Carmen)	1,3	Filón	1	0	2	0	1	0	0	0
Jorge Flórez (La Toma – El Carmen)	1,3	Filón	1	0	0	8	0	1	0	0
Hermanos Aguirre (Gelima)	1,3	Filón	1	0	5	2	1	0	0	0
Trituradora El Carmin (Isaac Lucumí)	1,3	Filón	1	0	4	1	1	0	0	0
El Aguacatal (Leiber Lucumí)	1,3	Filón	1	0	3	1	1	0	0	0
José Ibarra El Desquite	1,3	Filón	1	0	0	1	0	1	1	8
Pedro Cortes (El Desquite)	1,3	Filón	1	0	3	0	1	0	0	0
Pastor Mina (El Bosque – Maravelez)	1,3	Filón	1	0	3	2	1	0	0	0
Wilson Mera Maravelez	1,3	Filón	1	0	3	0	1	0	0	0
Harold Restrepo (Maravelez)	1,3	Filón	0	1	0	6	0	1	0	0
Areley Antonio Acosta (Tamboral)	1,3	Filón	1	0	3	0	1	0	1	22
Laurentino Vergara (Tamboral)	1,3	Filón	1	0	3	0	1	0	0	0
Molino Cooperativa (Fanor Lucumí)	1,3	Filón	1	0	4	0	1	0	0	0
Luis Velásquez y Cia (El Calvario)	1,3	Filón	1	0	4	1	1	0	0	0
Alonso Giraldo y Cía (El Danubio)	1,3	Filón	1	0	4	1	1	0	1	32
Eusebio Lucumí (La Carolina)	1,3	Filón	1	0	4	1	1	0	0	0
William Benavides	2	Filón	0	1	N/A	N/A	1	0	1	167
Quebrada saladito (mina de Celso Caraca)	3	Aluvion	0	0	0	0	1	1	0	0
Quebrada San Martín	3	Aluvion	0	0	0	0	1	1	0	0
Río Cauca: área de San francisco	3	Aluvion	0	0	0	0	1	1	0	0
Río Ovejas	3	Aluvion	0	0	0	0	1	1	0	0
Río Inguitó	3	Aluvion	0	0	0	0	1	1	0	0

Fuentes: (1) (Lopez 2006) (2) (Servicio Geológico Colombiano 2012) (3) (Corporación Autónoma Regional del Cauca 2006a)

Tabla 4. Escenario base para la estimación de la huella hídrica de la minería de oro en el municipio de Suarez (Cauca)

Planta de procesamiento o lugar de explotación	Capacidad Molienda	Producción oro Ley 750	Producción oro Ley 999	Agua in	Agua out	HHA	HHG						
							Hg usado	Vertimiento Hg Metodología 1	Vertimiento Hg Metodología 2	CN usado	Vertimiento CN	HHG Metodología 1	HHG Metodología 2
	ton/día	g/día	g/día	m3/día	m3/día		g/día	g/día	g/día	kg/día	kg/día	m3/día	m3/día
Joseías Lucumí (La Toma)	0.4	1.8	1.4	0.1	0.1	0.0	49.5	1.7	9.1	0.0	0.0	838.4	4573.8
Molino de la Coop. (La Toma – El Carmen)	10.4	70.2	52.7	62.4	56.9	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Freddy Borja (La Toma - El Carmen)	5.0	33.8	25.3	30.0	27.4	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Jorge Flórez (La Toma – El Carmen)	3.2	14.4	10.8	1.0	0.9	0.1	396.0	13.4	73.2	0.0	0.0	6707.2	36590.4
Hermanos Aguirre (Gelima)	13.3	89.8	67.3	79.8	72.8	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Trituradora El Carmin (Isaac Lucumí)	10.4	70.2	52.7	62.4	56.9	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
El Aguacatal (Leiber Lucumí)	7.9	53.3	40.0	47.4	43.2	4.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
José Ibarra El Desquite	2.4	33.4	25.0	6.4	5.8	0.6	297	10.1	54.9	30.0	12.0	17030.4	39442.8
Pedro Cortes (El Desquite)	7.5	50.6	38.0	45.0	41.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Pastor Mina (El Bosque – Maravelez)	8.3	56.0	42.0	49.8	45.4	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Wilson Mera Maravelez	7.5	50.6	38.0	45.0	41.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Harold Restrepo (Maravelez)	2.4	10.8	8.1	0.8	0.7	0.1	297	10.1	54.9	0.0	0.0	5030.4	27442.8
Areley Antonio Acosta (Tamboral)	7.5	106.0	79.5	62.5	57.0	5.5	0.0	0.0	0.0	80.6	32.3	32250.0	32250.0
Laurentino Vergara (Tamboral)	7.5	50.6	38.0	45.0	41.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Molino Cooperativa (Fanor Lucumí)	10.0	67.5	50.6	60.0	54.7	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Luis Velásquez y Cía (El Calvario)	10.4	70.2	52.7	62.4	56.9	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Alonso Giraldo y Cía (El Danubio)	10.4	147.0	110.2	86.7	79.1	7.6	0.0	0.0	0.0	120.0	48.0	48000.0	48000.0
Eusebio Lucumí (La Carolina)	10.4	70.2	52.7	62.4	56.9	5.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
William Benavides	50.0	706.7	530.0	416.7	380.1	36.6	0.0	0.0	0.0	625.0	250.0	250000.0	250000.0
Quebrada saladito (mina de Celso Caraca)	2.2	10.0	7.5	14.0	14.0	0.0	200.0	3.1	50.8	0.0	0.0	1550.0	25410.0
Quebrada San Martín	2.2	10.0	7.5	14.0	14.0	0.0	200.0	3.1	50.8	0.0	0.0	1550.0	25410.0
Río Cauca: área de San francisco	1.6	7.0	5.3	9.8	9.8	0.0	140.0	2.2	35.6	0.0	0.0	1085.0	17787.0
Río Ovejas	2.2	10.0	7.5	14.0	14.0	0.0	200.0	3.1	50.8	0.0	0.0	1550.0	25410.0
Río Inguitó	1.1	5.0	3.8	7.0	7.0	0.0	100.0	1.6	25.4	0.0	0.0	775.0	12705.0
TOTALES	194.2	1795.1	1346.3	1284.61	1177.02	107.59	1879.5	48.2	405.5	855.6	342.3	366366.3	545021.8
	ton/año	kg/año	kg/año	m3/año	m3/año	m3/año	kg/año	kg/año	kg/año	kg/año	kg/año	m3/año	m3/año
	47392.9	438.0	328.5	313444.0	287192.3	26251.8	458.6	11.8	99.0	208772.5	83509.0	89393371.5	132985319.2
							m3/kg de oro	HHG solo Hg		HHG solo CN		m3/kg de oro	m3/kg de oro
							79.91	m3/kg de oro	m3/kg de oro			272125.39	404825.11
									17912.8	150612.5			
									m3/año	m3/año			
									5884371.5	49476319.2			
											83509000.0		

Fuente. Cálculos propios

El indicador de HHA se estimó en 79.91 m³/kg de oro, que es más alto que los valores reportados en Segovia (Antioquia) de 58.69 m³/kg de oro (González Valencia et al. 2012) y en la mina “reina de oro” en Vetas (Santander) de 21.79 m³/kg de oro (Pardavé y Delvasto 2017); en ambas minas se utilizan procesos similares de beneficio del mineral propios de la pequeña y mediana minería. Por otra parte, el valor resultó ser bajo si se compara con la HHA estimada en el estudio de Haggard (2015) en donde se calculó en 228 m³/kg de metal producido para una planta con características de gran minería en donde se extraen metales preciosos del grupo platino (rutenio, rodio, paladio, osmio, iridio y platino) en Sudáfrica.

Para el indicador de HHA se evidencia una mayor incorporación de agua en los procesos productivos en la gran minería en comparación con las plantas de pequeña y mediana minería debido a la tecnificación de las plantas que incluye un mayor número de etapas de refinamiento, y servicios auxiliares de refrigeración, limpieza, transporte hidráulico, entre otros que aumentan el consumo de agua por kg de metal producido.

En la tabla 5 se encuentran los valores para la HHA anual estimado desde el año 2001 hasta el año 2015, teniendo en cuenta la producción oficial de oro reportada en el municipio. Estos valores se encuentran entre 838.1 y 67,940.2 m³/año, sin embargo, estas estimaciones solo son comparable entre minas o sectores mineros con igual o similar capacidad producción de oro, y debido a la limitada cantidad de estudios sobre el tema no se pudo proceder a realizar la comparación dentro del sector minero.

Ante la falta de estimaciones de indicadores de huella hídrica para municipios del departamento del Cauca, se procedió a comparar con valores de HHA reportados para otros sectores en otros municipios o grupo de municipios de Colombia. Por ejemplo, en el estudio “*Evaluación de la Huella Hídrica en la Cuenca del Río Porce*” (CTA 2013) se reporta para el municipio de Gómez Plata (Antioquia), el cual tiene un área (360 km²) y una población (16,101) similar al municipio de Suarez (390 km² y 18,656), una HHA en el sector domestico de 40 m³ por habitante equivalente a 644,040 m³ por año. La HHA de otros sectores como el hidroeléctrico (24 millones de m³ por año), pecuario (12

millones de m³ por año) o sector agrícola (14 millones de m³ por año), se encuentran reportados para el total de la cuenca la cuenca del río Porce. A partir del análisis de las diferentes HHA se puede inferir que la actividad minera de oro no es una actividad que retenga una excesiva cantidad de agua en el proceso productivo.

Tabla 5. Indicadores de HHA y HHG de la minería de oro en el periodo de 2001 a 2015 en el municipio de Suarez (Cauca).

Parametro	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
HHA m3/año	11006.4	7745.7	13375.8	838.1	6021.9	5810.6	9454.4	25058.9	38076.1	12290.4	7989.1	29092.1	67940.2	22678.5	31078.4
HHG 1 millones m3/año	37.5	26.4	45.5	2.9	20.5	19.8	32.2	85.3	129.7	41.9	27.2	99.1	231.4	77.2	105.8
HHG 2 millones m3/año	55.8	39.2	67.8	4.2	30.5	29.4	47.9	126.9	192.9	62.3	40.5	147.4	344.2	114.9	157.4

Fuente: Cálculos Propios.

En relación con el indicador de la HHG, en el caso base (tabla 4) se estimó con la metodología 1 un valor de 272,125.39 m³/kg de oro y con la metodología 2 de 404,825.11 m³/kg de oro. En la metodología 1 la etapa de amalgamación se realiza en un proceso semi-cerrado con mayor porcentaje de reciclaje de mercurio y por lo tanto la contaminación por mercurio tan solo representa un 7% de la HHG (figura 6 a). Mientras que en la metodología 2, en donde se supuso que el mercurio se utilizaba en ciclos abiertos, el 37% de la HHG (figura 6 b) corresponde a la contaminación por mercurio.

En referencia al efecto de la contaminación por cianuro, se evidencia que este contaminante es el que mayor contribuye al cálculo de la HHG, debido a que en las plantas de mayor capacidad de molienda de Suarez se utiliza la técnica de cianuración. Es importante resaltar que la contaminación por cianuro tiene un efecto de corto plazo y no es bio-acumulable (a excepción de algunos complejos) debido a que una parte puede ser degradada por el efecto de la radiación UV en el sol (Pedraza-Avella, Acevedo-Peña, y Pedraza-Rosas 2008), sin embargo, la posible formación de complejos solubles de cianuro con otros metales, como el mercurio, y la posible ruptura de diques de almacenamiento y derrame de relaves a fuentes de agua, puede generar la producción de ácido cianhídrico, uno de los gases más venenosos para la vida animal, cuando el pH del agua alcanza valores inferiores a 11.

Los valores estimados en el presente estudio son menores a los del estudio del CTA (2013) que calculó la HHG de la minería de oro en 1.5 millones de m³ de agua por kg de oro extraído por los procesos de beneficio de amalgamación y cianuración en la pequeña y mediana minería de Segovia, Amalfi, Anorí, Remedios y Zaragoza (Antioquia). Esta diferencia se explica porque en Suarez el 50% de las plantas de procesamiento basan su producción exclusivamente en métodos gravimétricos sin utilizar productos químicos tóxicos como el cianuro o el mercurio; mientras que para el grupo de municipios de Antioquia las estimaciones se realizaron con uso de mercurio en todas las plantas de extracción de oro, lo que se relaciona con el hecho de que municipios como Segovia sea el de mayor número de casos de intoxicación por mercurio en Colombia (Cosoy 2017)



Figura 6. HHG

Fuente: Cálculos Propios.

Por otro lado, existe una gran diferencia si se compara con la HHG reportada para la planta de gran minería de extracción de metales del grupo platino en Sudáfrica (Haggard 2015) en donde la HHG se calculó en 578 m³/kg de metal extraído. En este sentido, es preciso resaltar que el carácter legal de la gran minería obliga a que se cumpla la reglamentación ambiental de forma más estrictas y aplicando mayores controles a las descargas de los efluentes.

Sin embargo, en la gran minería las cantidades de metal extraído se miden en toneladas por año, contrario a kilogramos por año para la pequeña y mediana minería; esto produce un alto impacto al calcular la HHG anual (m³/año) que resulta en valores en el orden de

decenas de millones de $\text{m}^3/\text{año}$; esto sin contar con el impacto generado después de la clausura de la mina y el posterior manejo requerido por las colas o relaves del proceso minero que contienen una alta concentración de sustancias tóxicas que no son contabilizadas en los cálculos de HHG de la gran minería por ser vertidas y almacenadas al interior de la mina y no a cuerpos externos de agua.

La tabla 5 y la figura 7, muestran los valores estimados de la HHG con las dos metodologías para los años 2001-2015 el municipio de Suarez, encontrándose entre 2.9 y 231.4 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ para la metodología 1, y en el rango de 4.2 a 344.2 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ para la metodología 2. Estos valores son menores en comparación con los estimados en el análisis realizado para el municipio de Segovia (Antioquia) que arrojó valores de HHG entre 870.45 millones de $\text{m}^3/\text{año}$ hasta 3,650.06 millones de $\text{m}^3/\text{año}$; sin embargo, la producción de oro en dicho municipio estuvo en el rango entre 1.7-5.5 toneladas de oro en los años de estudio, lo que representa un orden de magnitud mayor que la producción de Suarez. Los valores HHG anualizados en el municipio de Suarez por ambas metodologías evidencian una situación crítica a nivel ambiental, debido a las altas cantidades de agua limpia requeridos para asimilar la contaminación generada por la producción de 1kg de oro. Teniendo en cuenta que estas minas vierten sus residuos al embalse de la salvajina y al río Cauca, estos resultados constituyen una señal de alerta para la población de la ciudad de Cali que tiene como fuente de agua al río Cauca.

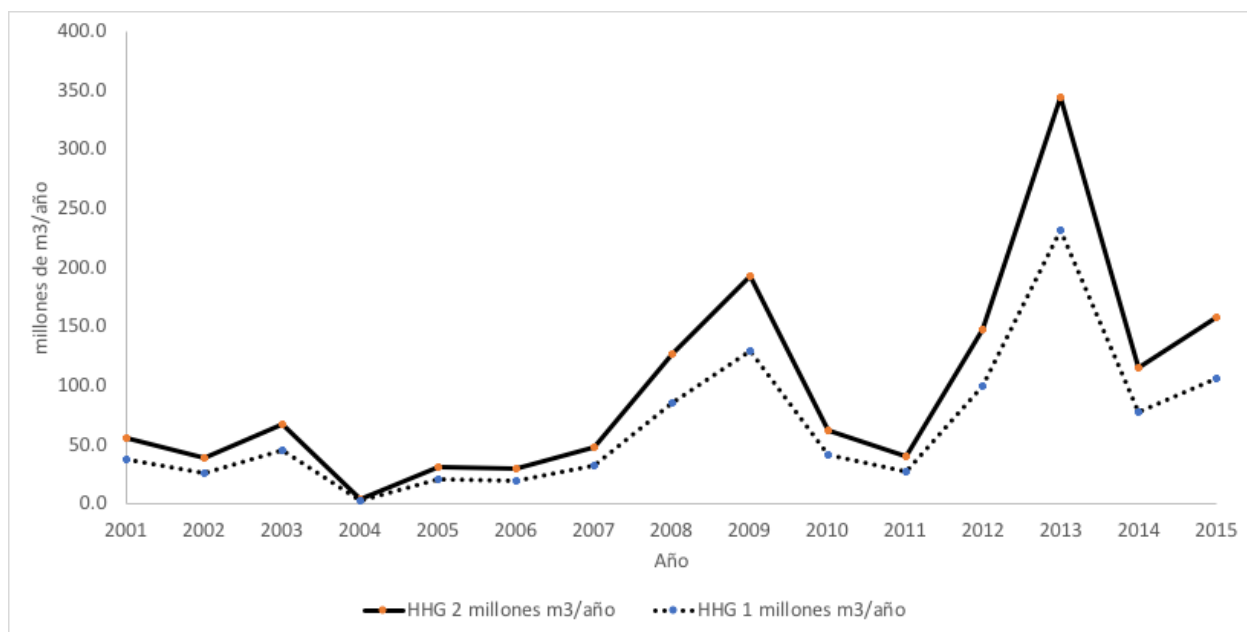


Figura 7. HHG

Fuente: Cálculos Propios.

La HHG anual de la minería de oro del municipio de Suarez puede compararse con estimaciones de HHG en otros sectores, por ejemplo, para la cuenca del río Porce que tiene un área de 5.248 km² e incluye 29 municipios del departamento de Antioquia la HHG del sector agrícola es de 5 millones de m³/año y la del sector pecuario es de 220 millones de m³/año. Estos datos comprueban los graves efectos de la minería sobre el recurso hídrico, y es preocupante que la actividad de minería aurífera en el municipio de Suarez con un área geográfica 13 veces menor a la cuenta del río Porce, genere mayor contaminación en el agua que actividades que ocupan grandes extensiones de tierra y usan intensivamente el agua como la agricultura y las explotaciones pecuarias.

Con los resultados obtenidos se procedió a formular estrategias y propuestas para el sector de la minería de oro, que pueden ser aplicadas en áreas de influencia de pequeña y mediana minería, como en el municipio de Suarez. Las estrategias y recomendaciones propuestas se listan a continuación:

- Superar las dificultades en la implementación del plan único de Mercurio y erradicar el uso en el país de este metal. Frenando de forma efectiva las fuentes

de importación ilegal del material al país.

- Fortalecer las instituciones de control para el sector minero y lograr la legalización del sector en el país.
- Dar a conocer el indicador huella hídrica y convertir esta metodología en una herramienta estándar de medición para la minería de Colombia.
- Aprovechar las nuevas tendencias de consumidores conscientes para lograr mayores precios en la venta del oro y generar incentivos para procesos limpios que representen menor impacto ambiental. Esto generaría una vuelta al uso de procesos de minería artesanal con responsabilidad ambiental, logrando convertir a la pequeña minera y la minería de subsistencia a procesos donde solamente se utilicen métodos de extracción gravimétricos.
- Apoyar los procesos de conversión tecnológica a través de centros de capacitación mineros en las poblaciones de influencia de esta actividad económica. Propiciando la transformación en el caso de la mediana minería, de plantas de amalgamación a plantas de cianuración con manejo adecuado de los relaves o colas y logrando así reducciones en la HHG.
- Incentivar el cooperativismo y las asociaciones entre pequeños mineros, logrando construir modelos de coexistencia entre los grupos organizados de pequeños mineros con los actores de la mediana y gran minería; permitiendo sinergias productivas como el procesamiento de material recolectado por los pequeños mineros en plantas industriales de la mediana y gran minería.
- Tener un especial cuidado con los procesos de concentración gravimétricos, que, aunque no utilizan insumos tóxicos, pueden llevar a un incremento de los sólidos suspendidos en el agua, que al llegar a ríos u otros cuerpos de agua pueden disminuir la disponibilidad de alimento para peces y reducir capacidad de

absorción de luz en el lecho del río, generando desequilibrios en los ecosistemas acuáticos(UNDOC y Ministerio de Justicia y del Derecho 2016). Se recomienda en un futuro estudio, medir la HHG asociada a los sólidos en suspensión vertidos en la minería de oro.

7 CONCLUSIONES

En este estudio se realizó una aproximación al cálculo de los indicadores de la huella hídrica en la minería aurífera del municipio de Suarez (Cauca) encontrado que la huella hídrica azul es de 79.91 m³ por kg de oro extraído y la huella hídrica gris esta el rango de 272,125.39 a 404,825.11 m³ por kg de oro extraído; estos valores permiten confirmar el alto impacto de la minería aurífera en los cuerpos de agua causada mayoritariamente por la contaminación por cianuro (93-63%) y mercurio (7-37%), mientras que la incorporación de agua en el proceso minero (huella hídrica azul) no es tan alto comparado con otros sectores productivos.

Estos resultados permiten formular estrategias y propuestas para el sector de la minería de oro, entre las que se encuentran incentivar la conversión tecnológica y eliminación total del uso del mercurio; incentivar la coexistencia entre la pequeña, mediana y gran minería a través de alianzas; y avanzar en que la pequeña y la minería de subsistencia se enfoque en métodos gravimétricos de extracción en donde se puedan obtener precios especiales de venta de oro por ser extraído de forma responsable con el medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Colciencias por la financiación del proyecto “*Recuperación de Oro y Tratamiento de Aguas Residuales en la Industria Aurífera de la Región Pacífico Colombiano*” en la convocatoria 669 de 2014, a la Universidad del Valle y al grupo de Investigación en Procesos Avanzados para Tratamientos Biológicos y Químicos (GAOX). Igualmente, a Jorge Iván Londoño y Wilmar David Montenegro del Servicio Geológico Colombiano, por la información suministrada y acompañamiento técnico.

Un especial agradecimiento al profesor Mario Alejandro Pérez Rincón del Instituto Cinara de la Universidad del Valle por haber introducido al autor en la fascinante área de la economía ecológica y ambiental.

REFERENCIAS

- Alcaldía de Suárez - Cauca. 2014. «Mapa Politico Suarez Cuaca Corregimiento y Veredas». Recuperado 6 de octubre de 2017 (http://suarez-cauca.gov.co/mapas_municipio.shtml?apc=bcxx-1-&x=1830926).
- Arevalo, Diego, Juan Guillermo Lozano, y Javier Sabogal. 2011. «Estudio nacional de Huella Hídrica Colombia Sector Agrícola». *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo* 7:103-26. Recuperado (<https://upcommons.upc.edu/handle/2099/11915>).
- Baquero, A. 2017. «Aplicabilidad del concepto de huella hídrica en la minería aurífera». Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Recuperado (<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6796/1/BaqueroMuñozAndreaTatiana2017.pdf>).
- Buanaventura, Andrea y Daniela Trujillo. 2012. *Historia doble del Cauca: Reconstrucción local de Suárez y Buenos Aires*. 1.^a ed. Cali, Colombia: Editorial Académica Española.
- Cabrera, Abraham Aparicio. 2014. «Historia Económica Mundial 1950–1990». *Economía Informa* 385:70-83. Recuperado (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0185084914704207>).
- Central Intelligence Agency. 2011. «The World Factbook». Recuperado 5 de febrero de 2018 (<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>).
- Contraloría General de la República. 2013. *Minería en Colombia: Institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos*. Bogotá D.C: Imprenta Nacional de Colombia. Recuperado (<http://www.contraloriagen.gov.co/documents/10136/182119332/MineriaEnColombia-Vol2.pdf/6cc33e0c-29e9-4a65-8561-1215fa8d07a0>).
- Corporación Autónoma Regional del Cauca. 2006a. *Aspecto Minero n el Municipio de Suarez, Area de Influencia Corregimiento de Mindala y La Toma*. Popayan. Recuperado (http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/mineria/MINERIA_SUAREZ/DIAGNOSTICO_MINERO.pdf).
- Corporación Autónoma Regional del Cauca. 2006b. *Diagnostico ambiental en el*

- municipio de Suarez, área de influencia: corregimiento de mindala y la toma.*
Popayan. Recuperado
([http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/mineria/MINERIA
SUAREZ/DIAGNOSTICO AMBIENTAL.pdf](http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/mineria/MINERIA_SUAREZ/DIAGNOSTICO AMBIENTAL.pdf)).
- Cosoy, Natalio. 2017. «Miedo en Segovia, el lugar de Colombia más contaminado con mercurio». *Revista Semana*. Recuperado
(<https://www.semana.com/nacion/articulo/intoxicacion-con-mercurio-en-segovia/525908>).
- CTA. 2016. *Aproximación a la Evaluación de la Huella Hídrica de la minería de oro y carbon en Colombia*. Recuperado
(http://www.upme.gov.co/seccionmineria_sp/Guia_huella_hidrica.pdf).
- CTA. 2013. *Evaluación de la Huella Hídrica en la Cuenca del Río Porce*. Recuperado
([file:///C:/Users/lalvarez/Desktop/Rio Porce/LibroHuellaHidrica.pdf](file:///C:/Users/lalvarez/Desktop/Rio%20Porce/LibroHuellaHidrica.pdf)).
- CTA, GSI-LAC, COSUDE, y IDEAM. 2015. *Evaluación Multisectorial de la Huella Hídrica en Colombia. Resultados por subzonas hidrográficas en el marco del Estudio Nacional del Agua 2014*. editado por CTA. Medellín, Colombia. Recuperado
(http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023272/HH_ENA2014.pdf).
- Deutsche Bundesbank. 2018. «Price of gold in London». Recuperado 1 de febrero de 2018
(https://www.bundesbank.de/Navigation/EN/Statistics/Time_series_databases/Macro_economic_time_series/its_list_node.html?listId=www_s331_b01015_3).
- Embajada de Suiza en Colombia. 2017. «Proyecto SUIZAGUA “Huella Hídrica puesta en práctica”». Recuperado 2 de diciembre de 2017
(<https://www.eda.admin.ch/countries/colombia/es/home/cooperacion/partner-lokal/acciones-directas/suizagua.html>).
- González Valencia, Juan Esteban, L. J. Montoya, A. Botero, D. Arévalo, y V. Valencia. 2012. «Aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de la minería del oro en el Municipio de Segovia, Antioquia (Colombia)». *Revista Internacional de Sostenibilidad, Tecnología y Humanism* 12(7):27-44.
- Haggard, E. 2015. «Water Footprint for a South African Platinum Mine». University of the Witwatersrand.

- Hoekstra, Arjen Y. y Ashok K. Chapagain. 2008. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*. editado por A. Y. Hoekstra y A. K. Chapagain. Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd. Recuperado (<http://doi.wiley.com/10.1002/9780470696224>).
- Hoekstra, Arjen Y., Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya, y Mesfin M. Mekonnen. 2011. *The Water Footprint Assessment Manual: setting the global standard*. 1.^a ed. London: Earthscan. Recuperado (<http://www.waterfootprint.org/?page=files/WaterFootprintAssessmentManual>).
- Hoekstra, Arjen Y. y P. Q. Hung. 2002. «A quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade». *Water Research* 49(11):203-9. Recuperado (<http://waterfootprint.org/en/water-footprint/national-water-footprint/virtual-water-trade/>).
- IDEAM. 2015. *Estudio Nacional del Agua*. Bogota D.C.
- Kuyucak, Nural y Ata Akcil. 2013. «Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes». *Minerals Engineering* 50-51:13-29. Recuperado (<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S089268751300188X>).
- Leah Temper, Daniela del Bene, y Joan Martinez- Alier. 2015. «Mapping the frontiers and frontlines of global environmental justice: the EJAtlas». *Journal of Political Ecology* 22:255-78.
- Lopez, P. 2006. «Evaluación Minero-Ambiental del Distrito Minero de Suarez». en *Apoyo a proyectos de producción más limpia en minería para los distritos mineros del Cauca*. Recuperado ([http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/mineria/MINERIA SUAREZ/MINERALIZACION Suarez.pdf](http://crc.gov.co/files/ConocimientoAmbiental/mineria/MINERIA_SUAREZ/MINERALIZACION_Suarez.pdf)).
- MADS - PNUMA. 2012. «Sinopsis Nacional de la Minería Aurífera Artesanal y de Pequeña Escala». *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Ministerio De Ambiente Y Desarrollo Sostenible* (Mc):72. Recuperado (https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio/Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf).
- Ministerio de Minas y Energía. 2015. *Glosario Técnico Minero*. Recuperado (<https://www.minminas.gov.co/glosario-minero1>).

- Molano Bravo, Alfredo. 2017. *De río en río. Vistazo a los territorios negros*. 1.^a ed. Bogotá D.C: Penguin Random House Grupo Editorial Colombia.
- Pardavé, Walter y Pedro Delvasto. 2017. «Estimation of the water footprint in a small scale gold ore beneficiation plant located in the municipality of Vetás, Santander, Colombia». en *XVI World Water Congress*. Quintana Roo, Mexico.
- Pedraza-Avella, J. A., P. Acevedo-Peña, y J. E. Pedraza-Rosas. 2008. «Photocatalytic oxidation of cyanide on TiO₂: An electrochemical approach». *Catalysis Today* 133-135(1-4):611-18.
- Pérez-Rincón, Mario, Julieth Vargas-Morales, y Zulma Crespo-Marín. 2018. «Trends in social metabolism and environmental conflicts in four Andean countries from 1970 to 2013». *Sustainability Science* 13(3):635-48. Recuperado (<http://link.springer.com/10.1007/s11625-017-0510-9>).
- Poveda Ramos, Gabriel. 2005. «La minería colonial y republicana. Cinco siglos de variantes y desarrollos». *Credencial Historia* (151). Recuperado (<http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/revistas/credencial/julio2002/lamineria.htm>).
- Rendón, Eric. 2015. «La huella hídrica como un indicador de sustentabilidad y su aplicación en el Perú». *Saber y Hacer. Revista de la Facultad de Ingeniería de la USIL* 2(1):32-47.
- Ruiz Solano, Verónica. 2016. «Propuesta de cambio tecnológico para la sustitución del proceso de amalgamación con mercurio en plantas de beneficio de oro a pequeña escala». Universidad del Valle.
- Semana, Revista. 2010. «De exportación». *Revista Semana*, 1. Recuperado (<https://www.semana.com/especiales/articulo/de-exportacion/108990-3>).
- Servicio Geológico Colombiano. 2012. *Mejoramiento Hidrometalúrgico y Ambiental en los Procesos de Beneficio en Buenos Aires y Suárez*.
- UNDOC y Ministerio de Justicia y del Derecho. 2016. *Explotación de oro de aluvión: Evidencias a partir de percepción remota*. Bogotá.
- Unidad de Planeación Minero Energética. 2005. *Distritos mineros: exportaciones e infraestructura de transporte*. Recuperado (http://www.upme.gov.co/Docs/Distritos_Mineros.pdf).

- Unidad de Planeación Minero Energética. 2015. «Guía para la elaboración del programa de uso eficiente y ahorro del agua en la minería de metales preciosos y carbón PUEAA». 52.
- Unidad de Planeación Minero Energética. 2018. «Sistema de Información Minero Energetico». Recuperado 10 de febrero de 2018 (<http://www1.upme.gov.co/simco/Paginas/default.aspx>).
- Veiga, Marcello M., Gustavo Angeloci-Santos, y John A. Meech. 2014. «Review of barriers to reduce mercury use in artisanal gold mining». *The Extractive Industries and Society* 1(2):351–361. Recuperado (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214790X14000203>).
- Wackernagel, M. y W. E. Rees. 1996. *Our ecological footprint: reducing human impact on the earth*. Philadelphia, PA: New Society Publishers.
- Wai, Wong, Leong Eugene, y Arun S. Mujumdar. 2009. «Gold Extraction and Recovery Processes». *Minerals, Metals and Materials Technology Center* 5-10.
- Wikipedia: The Free Encyclopedia. 2017. «Suárez (Cauca)». Recuperado 1 de marzo de 2018 ([https://es.wikipedia.org/wiki/Suárez_\(Cauca\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Suárez_(Cauca))).
- WWF. 2012. *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica*. Recuperado (<http://www.wwf.org.co/?249918/Una-mirada-a-la-agricultura-de-Colombia-desde-su-Huella-Hidrica>).